УДК 621.313.333:62-83:519.87

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ СО ВСТРОЕННЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПРИВОДОМ ТОРМОЗНОГО УСТРОЙСТВА

П.Р. Баранов, Ю.Н. Дементьев, И.Г. Однокопылов

Томский политехнический университет
E-mail: odivan@yandex.ru

Представлена математическая модель асинхронного двигателя с электромагнитным тормозным устройством, включенным в рассечку фазы статора. Модель двигателя описана уравнениями в трехфазной заторможенной системе координат, позволяющая учесть влияние электромагнита, встроенного в одну из фаз статора. Математическая модель, реализованная на языке программирования Delphi в виде программы, позволяет произвести расчет основных динамических режимов асинхронного двигателя с электромагнитным тормозным устройством, а также расчет аварийных режимов работы.

Все серийно выпускаемые асинхронные двигатели с электромагнитными тормозными устройствами (АД с ЭМТУ) оснащены нормально замкнутым дисковым механическим тормозом [1]. При пуске, под действием электромагнитного привода, фрикционные поверхности тормоза размыкаются, двигатель работает в обычном рабочем режиме. При отключении фрикционные поверхности тормоза под действием пружин замыкаются, осуществляя торможение и фиксацию вала АД. Эффективное механическое торможение и последующее надежное удержание вала привода обеспечивает безопасную эксплуатацию подъемно-транспортных машин и механизмов. Такая нормально закрытая конструкция тормоза соответствует требованиям Госгортехнадзора.

В настоящее время серийно выпускаются две модификации АД с ЭМТУ [1], которые различаются способом торможения электромагнитного привода тормозного устройства. К первой модификации относятся двигатели с независимым питанием растормаживающего электромагнита от сети через выпрямитель. Достоинством данной модификации является возможность управления тормозным устройством независимо от режима работы АД. Поэтому основная область применения таких АД с ЭМТУ – частотно-регулируемый электропривод. Но тормозные устройства данной модификации имеют относительно большие габариты и массу, а также без дополнительных схем форсировки такие АД с ЭМТУ будут иметь невысокое быстродействие при пусках и торможениях.

Ко второй модификации относятся асинхронные двигатели и электромагнитные приводы тормозов, имеющие общее питание: выпрямитель с электромагнитом включаются в рассечку одной из фаз двигателя (рис. 1, 2). Достоинством таких АД с

ЭМТУ является форсированный пуск электромагнитного привода, что достигается за счет пусковых токов АД. Поэтому такие двигатели находят широкое применение в нерегулируемом электроприводе за счет относительно малых габаритов, высокого быстродействия при минимуме комплектующих изделий. По данным ОАО «СКБ Сибэлектромотор», г. Томск, производство тормозных двигателей с форсировкой от пусковых токов составляет порядка 80 % от общего количества АД с ЭМТУ.

На рис. 1 представлена одна из схем общего питания АД с ЭМТУ, предложенная фирмой «Siemens» [2]. В ней растормаживающий электромагнит, обмотка которого содержит две секции, с двухполупериодным выпрямителем устанавливается в рассечку одной из фаз АД. Такое схемное решение тормозного устройства было использовано при разработке двигателей серии 4А (4А80Е, 4А90Е, 4А100Е). При исследовании эксплутационных показателей этой серии были выявлены следующие недостатки: а) искажение формы тока двигателя, что приводит к снижению энергетических и пусковых показателей; б) увеличение габаритов электромагнита, что уменьшает эффективность охлаждения двигателя серийным вентилятором. Применение двухполупериодной схемы выпрямления с общей точкой оправдывалось уменьшением количества силовых диодов.

В настоящее время при разработке АД с ЭМТУ новой серии было предложено в качестве выпрямителя, питающий электромагнит, использовать традиционный мостовой выпрямитель, выполненный в одном корпусе в виде диодной сборки. Схема включения тормозного устройства приведена на рис. 2. Такое техническое решение позволяет по сравнению со схемой (рис. 1): а) вдвое сократить расход меди в обмотке электромагнита, б) повысить теплоотдачу электромагнита за счет более полного заполнения медью обмоточного пространства, в) снизить искажения тока двигателя [3].

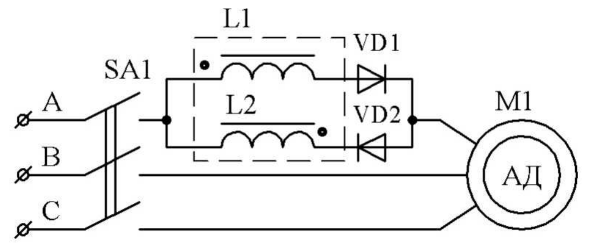


Рис. 1. Схема подключения встроенного электромагнитного тормоза с двухсекционной обмоткой

При создании новой серии АД с ЭМТУ такое схемное решение является наиболее перспективным и оптимальным для нерегулируемого электропривода. В процессе разработки такой серии необходимо провести исследования работы АД с ЭМТУ с целью выявления параметров тормозного устройства, влияющих на энергетические и эксплутационные показатели серийного АД. С точки зрения материальных затрат и сроков проектирования наиболее эффективным способом является математическое моделирование.

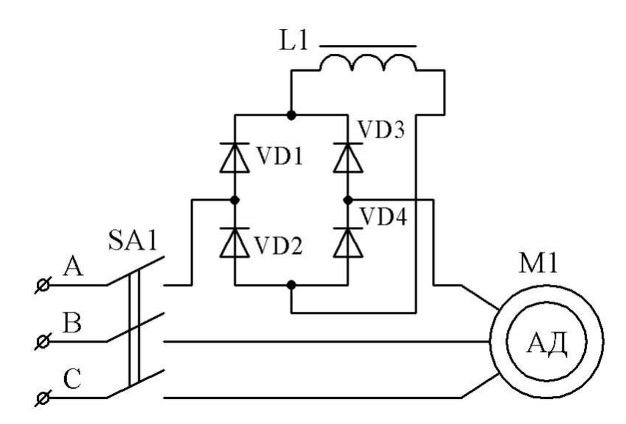


Рис. 2. Схема подключения встроенного электромагнитного тормоза с общим питанием

Так как схемное решение встроенного ЭМТУ (рис. 2) вносит несимметрию в напряжения, питающие АД, то при создании математического модели необходимо учесть данный вид несимметрии.

В технической литературе, как правило, для исследования работы АД приводятся математические модели, уравнения которых записаны в двухфазной системе координат. Приведенные в литературе модели, позволяющие исследовать несимметричные режимы [4–6] громоздки и с практической точки зрения трудно реализуются. В связи с этим предложена универсальная математическая модель асинхронного двигателя, позволяющая рассчитывать динамические и статические режимы при различных видах несимметрии.

При составлении уравнений математической модели асинхронной трехфазной машины примем следующие допущения: магнитная цепь АД ненасыщена; энергия магнитного поля сосредоточена в воздушном зазоре; потери в стали и механические потери пренебрежимо малы; воздушный зазор равномерен; напряжения фаз синусоидальны; питающая сеть – идеальная. Диоды мостового выпрямителя идеальны.

Если при моделировании АД уравнения записать в естественной трехфазной системе координат, то взаимные индуктивности между обмотками статора и ротора являются периодическими коэффициентами и изменяются по гармоническому закону при вращении ротора машины. Поэтому чтобы перейти от периодических коэффициентов к постоянным необходимо уравнения АД описать в заторможенной системе координат (α,β,γ), которая неподвижна относительно статорных осей. Система дифференциальных уравнений в этом случае имеет вид [4]:

$$U_A = R_s \cdot i_A + \frac{d\Psi_A}{dt},$$

$$U_B = R_s \cdot i_B + \frac{d\Psi_B}{dt},$$

$$U_C = R_s \cdot i_C + \frac{d\Psi_C}{dt},$$

$$0 = R_r \cdot i_a + \frac{d\Psi_a}{dt} + (\Psi_b - \Psi_c)\omega / \sqrt{3},$$
$$0 = R_r \cdot i_b + \frac{d\Psi_b}{dt} + (\Psi_c - \Psi_a)\omega / \sqrt{3},$$
$$0 = R_r \cdot i_c + \frac{d\Psi_c}{dt} + (\Psi_a - \Psi_b)\omega / \sqrt{3}, \qquad (1)$$

где R_s, R_r – сопротивления фазы статора и ротора соответственно, U_A, U_B, U_C – фазные питающие напряжения, i_A, i_B, i_C, i_a, i_b, i_c – токи в фазах статора и ротора, ω – угловая скорость вращения вала АД, Ψ_A – потокосцепление фазы:

$$\Psi_A = L_{SA} i_A - \frac{1}{2} L_m i_B - \frac{1}{2} L_m i_C + L_m i_a - \frac{1}{2} L_m i_b - \frac{1}{2} L_m i_c .$$

Потокосцепления Ψ_B, Ψ_C, Ψ_a, Ψ_b, Ψ_c записываются аналогично. Подставляя потокосцепления в систему уравнений (1), получим 6 уравнений и 6 неизвестных:i_A, i_B, i_C, i_a, i_b, i_c. Для решения полученной системы численными методами необходимо привести ее к нормальной форме Коши. Алгебраическими преобразованиями систему (1) к нормальной форме Коши привести затруднительно, поэтому воспользуемся матричной формой записи уравнений. Матричное уравнение в нормальной форме Коши будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{d[i]}{dt} = [L_1]^{-1} \cdot \{[U] - ([R] + [L_2] \cdot \frac{\omega}{\sqrt{3}}) \cdot [i]\}, \qquad (2)$$

где $[i]$ – матрица неизвестных (токи статора и ротора); $[U]$ – матрица напряжений; $[R]$ – матрица сопротивлений; $[L_1]$, $[L_2]$ – матрицы индуктивностей:

$$[i] = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}; \quad [U] = \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad [R] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix};$$

$$[L_1] = \begin{bmatrix} L_S & -L_m/2 & -L_m/2 & L_m & -L_m/2 & -L_m/2 \\ -L_m/2 & L_S & -L_m/2 & -L_m/2 & L_m & -L_m/2 \\ -L_m/2 & -L_m/2 & L_S & -L_m/2 & -L_m/2 & L_m \\ L_m & -L_m/2 & -L_m/2 & L_R & -L_m/2 & -L_m/2 \\ -L_m/2 & L_m & -L_m/2 & -L_m/2 & L_R & -L_m/2 \\ -L_m/2 & -L_m/2 & L_m & -L_m/2 & -L_m/2 & L_R \end{bmatrix};$$

$$[L_2] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}L_m & -\frac{3}{2}L_m & 0 & \left(L_R + \frac{1}{2}L_m\right) & -\left(L_R + \frac{1}{2}L_m\right) \\ -\frac{3}{2}L_m & 0 & \frac{3}{2}L_m & -\left(L_R + \frac{1}{2}L_m\right) & 0 & \left(L_R + \frac{1}{2}L_m\right) \\ \frac{3}{2}L_m & -\frac{3}{2}L_m & 0 & \left(L_R + \frac{1}{2}L_m\right) & -\left(L_R + \frac{1}{2}L_m\right) & 0 \end{bmatrix}.$$

Решением системы матричного уравнения (2) являются токи во всех фазах статора и ротора. По токам можно определить электромагнитный момент двигателя M:

$$M = p_n \frac{\sqrt{3}}{2} L_m [(i_A i_c + i_B i_a + i_C i_b) - (i_A i_b + i_B i_c + i_C i_a)].$$

Уравнение движения электропривода для АД с ЭМТУ можно представить в следующем виде [7]:

$$\frac{J_\Sigma}{p_n} \cdot \frac{d\omega}{dt} = M - M_c - 1_{Q_T} M_T \mathrm{sign}(\omega),$$

где M_T – тормозной момент; J_Σ – суммарный момент инерции вращающихся масс, приведенных к валу двигателя; p_n – число пар полюсов; 1_{Q_T} – единичная функция: 1_{Q_T}=1 при $Q_{ТПР}<Q$, 1_{Q_T}=0 при $Q_{ТПР}>Q$; Q_T – тяговое усилие электромагнита, $Q_{ПР}$ – противодействующее усилие возвратных пружин; sign(ω) – функция, учитывающая реактивность тормозного момента: sign(ω)=1 при $\omega \geq 0$, sign(ω)=–1 при $\omega<0$.

Для учета влияния несимметрии, вносимой тормозным устройством в работу асинхронного двигателя, рассмотрим работу схемы включения ЭМТУ, например, в фазу «*A*» двигателя, рис. 3.

На рисунке: L_S, R_S – индуктивность и активное сопротивление обмотки статора АД; i_A – ток в обмотке статора в фазе «*A*»; $L_Э$, $R_Э$ – индуктивность и активное сопротивление электромагнита; i_d – выпрямленный ток электромагнита.

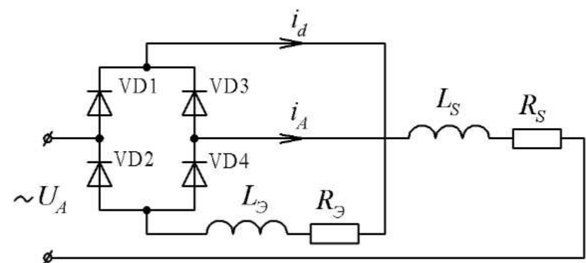


Рис. 3. *Электрическая схема фазы «А» асинхронного двигателя с подключенным электромагнитом*

Работа такой схемы происходит в два этапа и описывается следующими уравнениями.

Этап 1. Ток в схеме нарастает, выпрямленный ток i_d равен току статора i_A по модулю:

$$U_A = (R_S + R_Э) \cdot i_A + \frac{di_A}{dt}(L_S + L_Э), \quad i_d = |i_A|.$$

Этап 2. Ток i_d за счет энергии, накопленной в $L_Э$, спадает по замкнутому контуру:

$$U_A = R_S \cdot i_A + \frac{di_A}{dt} L_S, \quad i_d = R_Э \cdot i_d + \frac{di_d}{dt} L_Э .$$

Тогда матрица уравнения (2) на 1-ом этапе будет содержать индуктивность и активное сопротивление электромагнита $L_Э$, $R_Э$:

$$[L_1]=\begin{bmatrix} L_S+L_Э & -L_m/2 & -L_m/2 & L_m & -L_m/2 & -L_m/2 \\ -L_m/2 & L_S & -L_m/2 & -L_m/2 & L_m & -L_m/2 \\ -L_m/2 & -L_m/2 & L_S & -L_m/2 & -L_m/2 & L_m \\ L_m & -L_m/2 & -L_m/2 & L_R & -L_m/2 & -L_m/2 \\ -L_m/2 & L_m & -L_m/2 & -L_m/2 & L_R & -L_m/2 \\ -L_m/2 & -L_m/2 & L_m & -L_m/2 & -L_m/2 & L_R \end{bmatrix};$$

$$[R]=\begin{bmatrix} R_s+R_Э & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

Система дифференциальных уравнений (2) решена численным методом Рунге-Кутта 4-ого порядка и реализована на языке программирования Delphi. В полученной программе для АД АИР112М4 были рассчитаны графики переходных процессов пуска двигателя со встроенным ЭМТУ под нагрузкой.

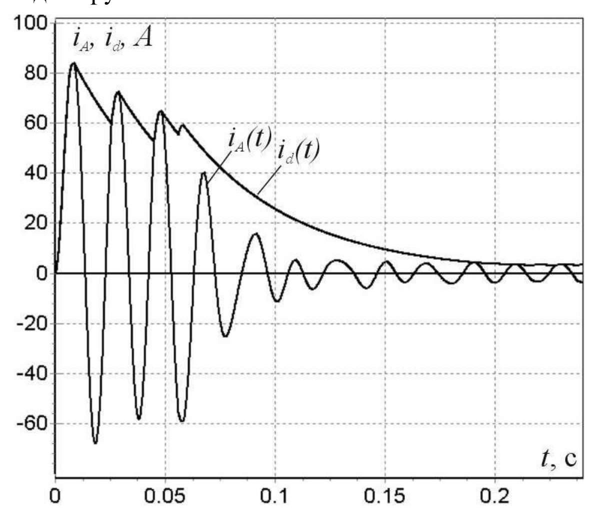


Рис. 4. *Графики переходных процессов $i_A(t)$, $i_d(t)$ при пуске АД с ЭМТУ*

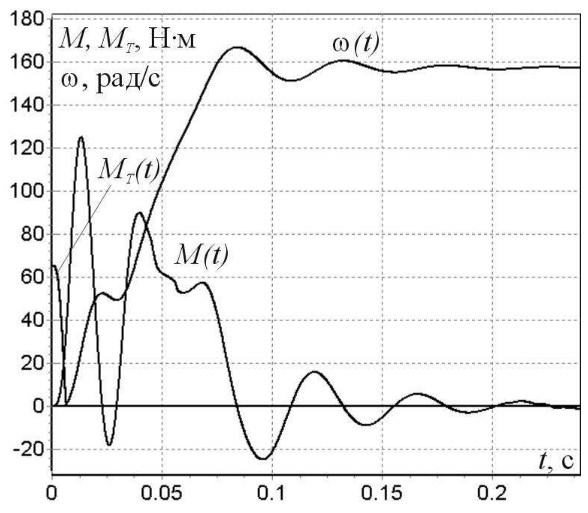


Рис. 5. *Графики переходных процессов $M(t)$, $M_T(t)$, $\omega(t)$ при пуске АД с ЭМТУ*

На рис. 4, 5 представлены графики переходных процессов $i_A(t)$, $i_d(t)$, $M(t)$, $M_T(t)$, $\omega(t)$ при пуске АД с ЭМТУ, полученные на предложенной математической модели. Выпрямленный ток электромагнита i_d при пуске двигателя – форсированный и равен пусковому току двигателя i_A. После срабатывания электромагнита тормозной момент M_T падает до нуля, и происходит разгон двигателя. Ток электромагнита i_d плавно снижается вместе с током статора.

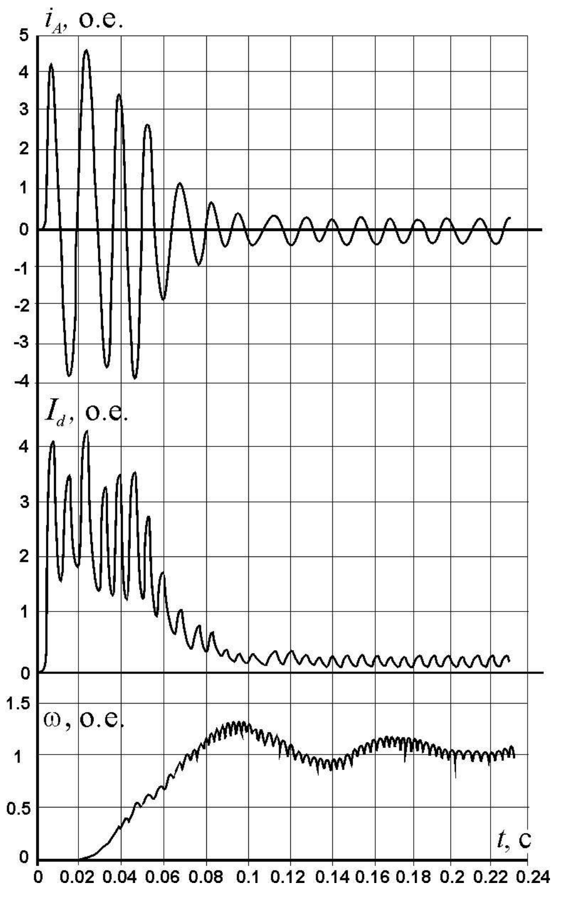


Рис. 6. *Экспериментальные графики переходных процессов $i_A(t)$, $i_d(t)$, $\omega(t)$ при пуске АД с ЭМТУ (1 о.е. соответствует номинальному режиму)*

В электромашинной лаборатории ОАО «СКБ Сибэлектромотор» (г. Томск), были проведены экспериментальные исследования. В качестве опытного образца использовался серийный асинхронный двигатель АИР112М4Е, оснащенный дисковым тормозным устройством. Питание электромагнитного привода осуществлялось через мостовой выпрямитель, включенный в рассечку фазы обмотки статора (рис. 2).

При помощи шлейфового осциллографа Н-115 фиксировались значения тока статора, электромагнита и угловая скорость вращения ротора АД в относительных единицах (рис. 6). В эксперименте использовался источник питания большой мощности, поэтому просадка напряжения при пуске АД не превышала 6 % от номинального значения.

Результаты сравнения экспериментальных данных и теоретических расчетов показали следующее. Кратность пускового тока при экспериментальных исследованиях (k_T=13) и на математической модели (k_T=15) находятся в пределах заданной погрешности. Кривые изменения тока статора и выпрямленного тока в динамическом режиме на модели и в реальном двигателе подобны. Однако следует отметить, что выпрямленный ток электромагнита i_d в эксперименте имеет более высокие пульсации, что объясняется насыщением магнитопровода при больших значениях тока при пуске двигателя. В математической же модели двигателя с тормозным устройством использовалось допущение о ненасыщенной магнитной системе, поэтому индуктивность электромагнита при пуске выше, чем у опытного образца, а значит, и пульсации выпрямленного тока меньше. Темп нарастания скорости вращения ротора также практически совпал с моделью.

Выводы

Предложена математическая модель, позволяющая корректно анализировать динамические электромеханические процессы в асинхронных двигателях со встроенным электромагнитным тормозом, включенным в рассечку фазы статора.

Разработанная математическая модель позволяет выявить параметры тормозного устройства, влияющие на энергетические и эксплутационные показатели серийного асинхронного двигателя, что дает возможность оптимизировать пусковые и рабочие характеристики двигателя при проектировании.

Модель позволяет проводить анализ динамических и энергетических показателей при существенной несимметрии трехфазных обмоток статора, а также для моделирования аварийных режимов работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технический каталог ОАО «СКБ Сибэлектромотор». – Томск, 2005.
2. Siemens Aktiengesellschaft. Hebezeug – Motorer. – Katalog H2, 1987. –78 S.
3. Электротехнический справочник: В 3-х т. Т. 2. Электротехнические изделия и устройства / Под общ. ред. профессоров МЭИ (гл. ред. И.Н. Орлова и др.). – 7-е изд., испр. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 712 с.: ил.
4. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2001. – 327 с.
5. Мощинский Ю.А., Петров А.П. Математическая модель несимметричного асинхронного двигателя на основе схем замещения для переходных режимов // Электротехника. – 2003. – № 2. – С. 24–30.
6. Казовский Е.Я. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока. – М.: Изд-во АН СССР, 1968. – 526 с.
7. Однокопылов И.Г. Математическая модель асинхронного двигателя с электромагнитным тормозным устройством // Наука. Технологии. Инновации: Матер. Всеросс. научной конф. молодых ученых в 6-ти частях. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – Ч. 1. – С. 52–54.

УДК 621.311.6